

Bildfolgenanalyse in der Umweltphysik:
Wasseroberflächenwellen und Gasaustausch
zwischen Atmosphäre und Gewässern

B. Jähne

Institut für Umweltphysik der Universität Heidelberg
Im Neuenheimer Feld 366, D-6900 Heidelberg

Zusammenfassung

Bildsequenzen von Wasseroberflächenwellen und Grenzschicht werden als neue Anwendung der Bildfolgenanalyse vorgestellt. Die Möglichkeiten der Auswertung mit Hilfe der Fouriertransformation und der Laplace-Pyramide werden diskutiert. Die quantitative Bildanalyse eröffnet weitreichende experimentelle Möglichkeiten für diesen Bereich der Umweltphysik; zugleich können sich aber auch Anstöße für die Weiterentwicklung der Bildfolgenanalyse als Methode ergeben.

1. Einführung: Die physikalische Problemstellung

Austauschvorgänge über die freie Grenzfläche zwischen einer Flüssigkeit und einem Gas sind von erheblicher ökologischer und technologischer Bedeutung. So ist der Gasaustausch zwischen Atmosphäre und Ozean ein wesentlicher Teilprozeß des globalen Stoffkreislaufs. Bei Binnengewässern steht die Frage der Wiederbelüftung mit Sauerstoff aus der Atmosphäre im Vordergrund. Schließlich werden Austauschprozesse zwischen Flüssigkeiten und Gasen in der chemischen Verfahrenstechnik vielfach angewandt.

Der Austausch von Spurengasen wird im allgemeinen bewirkt durch das Zusammenspiel zwischen dem Eindringen des Gases in den Wasserkörper durch molekulare Diffusion und dem turbulenten Abtransport in die Tiefe. Diese Vorgänge spielen sich in einer sehr dünnen (100 µm) Grenzschicht unmittelbar unter der Wasseroberfläche ab (Liss und Slater, 1974). Die grundlegenden Mechanismen dieses Wechselspiels, insbesondere die enorme Erhöhung der Austauschrate, sobald Wellen auf der Wasseroberfläche auftreten (Jähne, 1985), sind bis heute kaum verstanden.

Die bisher angewandten Meßtechniken werden dem komplexen Problem nicht gerecht: Auf der einen Seite liefern die konventionellen Massenbilanzmethoden nur Gasaustauschraten, die über große räumliche und zeitliche

Skalen gemittelt sind. Damit läßt sich weder die räumlich-zeitliche Struktur der Austauschprozesse noch ihre Korrelation zu den Wellen untersuchen. Auf der anderen Seite beschränken sich fast alle Wellenuntersuchungen bisher auf die Messung von Höhen- oder Neigungszeitserien der Wellen an einem Punkt.

Es ist offensichtlich, daß sich für beide Meßprobleme eine Analyse von Bildfolgen geradezu anbietet. Dazu ist aber als erster Schritt die Entwicklung geeigneter Aufnahmetechniken erforderlich.

2. Bildaufnahmetechniken (Jähne, 1985)

Wellen: Das Wellenvisualisierungsverfahren nutzt die Brechung des Lichts durch die Wellen aus. Durch ein geeignetes optisches System wird die Wasseroberfläche von unten beleuchtet, und zwar aus verschiedenen Richtungen, denen jeweils eine bestimmte Farbe oder Intensität zugeordnet ist. Die Brechung der Strahlen an der Wasseroberfläche selektiert für eine senkrecht von oben beobachtende Kamera entsprechend der jeweiligen Oberflächenneigung eine dieser Beleuchtungsrichtungen und macht so die Wellenneigungen durch unterschiedliche Farben sichtbar.

Im großen Wind/Wasser-Kanal des IMST in Marseille (Lifermann et al., 1985) und in einem ringförmigen Kanal in Heidelberg wurden Bildfolgen einer bis zu 40 x 40 cm großen Wasserfläche auf Videorekorder aufgenommen. Die Bilder belegen, daß selbst die kürzesten Kapillarwellen (Wellenlänge 2 mm) gut sichtbar sind (Abb. 1).

Abb. 1

Wellenneigungs-
visualisierung
8 m/s Windgeschwin-
digkeit, von links
nach rechts wehend,
IMST Marseille

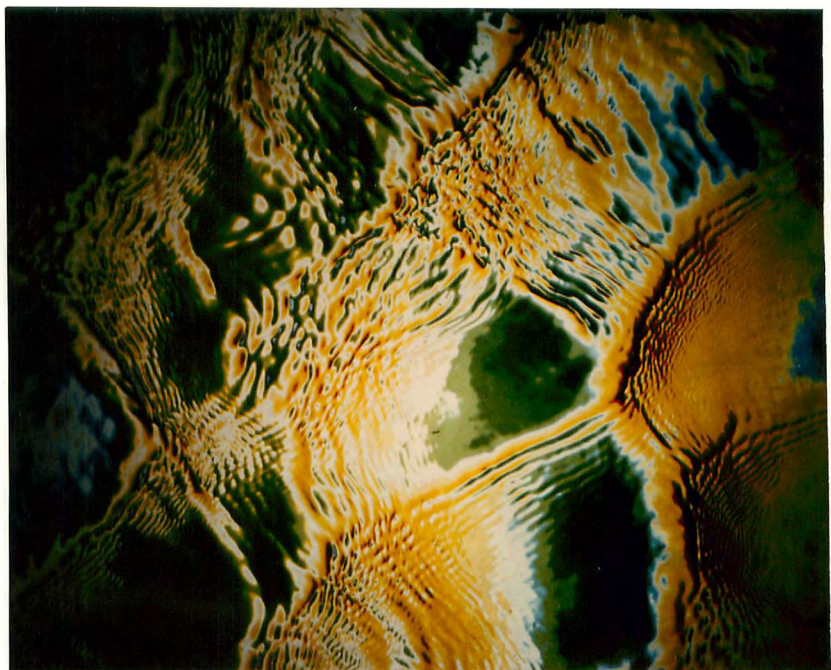
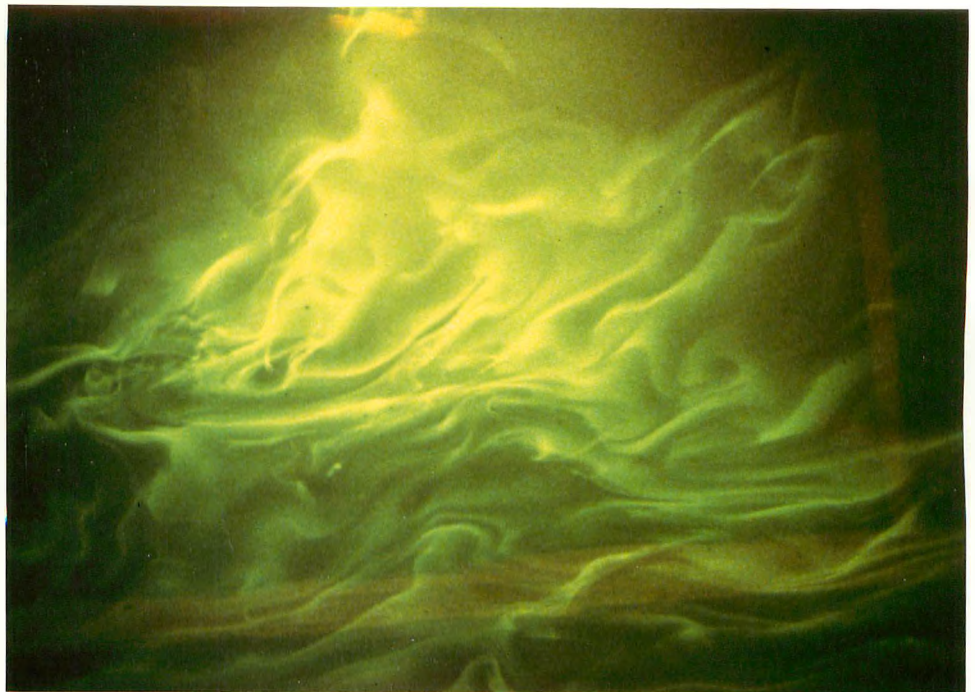


Abb. 2

Grenzschicht-
visualisierung
glatte Wasser-
oberfläche



Grenzschicht: Zur Sichtbarmachung der Grenzschicht wird eine chemische Methode angewandt: Ein alkalisch reagierendes Gas wird in einer angesäuerten Flüssigkeit absorbiert. Dadurch wird die wasserseitige, den Gasaustausch bestimmende Grenzschicht alkalisch. Sichtbar gemacht wird sie durch einen Fluoreszenzindikator, der nur im alkalischen Bereich fluoresziert. Einzelbilder der Grenzschicht liegen vom Heidelberger Windkanal vor (Abb. 2).

3. Globale Bildfolgenanalyse mit Hilfe der Fouriertransformation

Wasseroberflächenwellen sind ein nichtlineares und statistisches Phänomen. Zu ihrer Beschreibung gibt es daher eine Vielzahl an Modellvorstellungen (Phillips, 1977). Solange die Wellen-Wellen-Wechselwirkung schwach ist, sich also erst auf einer Skala bemerkbar macht, die viel größer ist als die entsprechenden Wellenlängen, kann die Fouriertransformation zur Bildfolgenanalyse gleichwohl eingesetzt werden. Die "Objekte" sind einzelne Frequenzkomponenten, die einen großen Bereich im Ortsraum umfassen und sich dabei mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten durchkreuzen. Im Ortsfrequenzraum dagegen sind sie scharf lokalisiert. Sinnvollerweise ordnet man daher Verschiebungsvektoren nicht Positionen im Ortsraum, sondern den einzelnen Frequenzkomponenten zu. Diese erfahren durch die Bewegung von Bild zu Bild eine Phasenverschiebung, die sich aus dem Kreuzkorrelationsspektrum ergibt zu

$$\psi = \arctan(Q_u/C_o)$$

Dabei sind Q_u und C_o das Quad- und das Cospektrum. Die Phasengeschwindigkeit c bzw. der Verschiebungsvektor \underline{u} berechnet sich daraus zu

$$c = \varphi / (k t) \quad \text{und} \quad \underline{u} = \varphi \underline{k} / k^2$$

t ist der Zeitunterschied zwischen der Aufnahme der beiden Bilder. Als weitere Information erhält man die Kohärenz. Eine Kohärenzerniedrigung ergibt sich erstens durch die Modulation der Phasengeschwindigkeit der kleinskaligen Wellen durch größere. Sie ist bei geringen Zeitunterschieden ($\omega t < 1$) zur Varianz der Phasengeschwindigkeit proportional:

$$\text{Coh}^2(t) = 1 - (kt)^2 \langle \Delta c^2 \rangle$$

Zweitens bedingt die nichtlineare Wechselwirkung eine begrenzte Lebensdauer eines Wellenzugs. Dadurch wird die Kohärenz in erster Näherung exponentiell mit der Zeit reduziert. Die unterschiedliche Zeitabhängigkeit erlaubt eine Separierung der beiden Prozesse und damit eine Abschätzung der nichtlinearen Wechselwirkung.

4. Lokale Bildfolgenanalyse mit Hilfe der Laplace-Pyramide

Wenn die Wechselwirkung zwischen den einzelnen Wellenlängen zu groß wird, stellen die global berechneten Fourierkomponenten keine sinnvolle Repräsentation mehr dar: Die kurzlebigen Objekte sind weder im Orts- noch im Ortsfrequenzraum scharf lokalisiert. Das heißt, als wesentliche Merkmale müssen ihre Skalen in beiden Räumen bestimmt werden. Die Laplace-Pyramide (Burt, 1984; Dengler, 1985) ist dazu aus folgenden Gründen eine geeignete Datenstruktur:

- a. Sie erlaubt eine sinnvolle Auftrennung der Frequenzkomponenten unter maximaler Erhaltung der räumlichen Lokalisierung.
- b. Auf jeder Stufe der Pyramide läßt sich mit den bekannten Verfahren (Nagel, 1985) ein Verschiebungsvektorfeld bestimmen.
- c. Ein Vergleich der Verschiebungsvektorfelder der verschiedenen Stufen ermöglicht die Detektion gekoppelter, d. h. mit gleicher Geschwindigkeit laufender Wellen unterschiedlicher Wellenlängen. Diese Kopplung ist ein wichtiges Phänomen bei Wasseroberflächenwellen. Die in Abb. 1 gezeigten Kapillarwellen auf der windabgewandten Seite der längerwelligen Gravitationswellen sind ein Beispiel solcher gebundener Wellen, die trotz Variation der Wellenlänge in erster Näherung keine Dispersion zeigen.

d. Derart segmentierte "Wellenpakete" können dann in einer längeren Bildsequenz verfolgt werden, bis sie sich "auflösen". Damit kann man ihre Lebensdauer bestimmen und gleichzeitig die Art der Wechselwirkung mit anderen Wellenpaketen untersuchen.

5. Ausblick

Die Diskussion der Möglichkeiten der Bildfolgenanalyse von Wellen und Grenzsicht eröffnet in zweierlei Hinsicht neue Perspektiven: Zum einen stellt sie ein wertvolles experimentelles Hilfsmittel dar, das einen im Vergleich zu Punktmessungen ungleich detaillierteren Einblick in komplexe Vorgänge erlaubt. Die Hoffnung ist berechtigt, daß sich dadurch der Dialog zwischen theoretischer und experimenteller Forschung belebt. Die Brücke dazu bildet die Bildanalyse, deren Algorithmen direkt mit den Modellvorstellungen zusammenhängen. Zum anderen könnte die vorgestellte Anwendung Anstöße für die Methodik der Bildfolgenanalyse selbst bewirken. Aufgrund der physikalischen Natur der Objekte werden zwar komplexe, aber klar definierte Fragen an die Verarbeitungsalgorithmen gestellt, die diese unter einem neuen Blickwinkel erscheinen lassen.

6. Literatur

Burt, P. J., 1984, The pyramid as a structure for efficient computation, in "Multiresolution Image Processing and Analysis", A. Rosenfeld Editor, Springer Verlag, Berlin

Dengler, J., 1985, Methoden und Algorithmen zur Analyse bewegter Realweltszenen im Hinblick auf ein Blindenhilfesystem, Dissertation, Universität Heidelberg

Jähne, B., 1985, Transfer processes across the free water surface, Habilitationsschrift, Fakultät für Physik und Astronomie, Universität Heidelberg

Lifermann, A., Ramamonjiarisoa, A., Jähne, B., 1985, Etude en soufflerie de la caractérisation de la rétrodiffusion radar par différents champs de vagues, Proceedings of the 3rd International Colloquium on Spectral Signatures of Objects in Remote Sensing, Les Arcs, France, 16 - 20 Dec. 1985, 137 - 140

Liss, P. S. und Slater, P. G., Flux of gases across the air/sea interface, Nature, 247, 181 - 184

Nagel, H.-H., 1985, Analyse und Interpretation von Bildfolgen, Informatik-Spektrum, 8, 178 - 200 und 312 - 317

Phillips, O. M., 1977, The dynamics of the upper ocean, Cambridge University Press, 2. edition